1961—2017年青藏高原东北部雨季降水量变化及其贡献度分析

杨昭明[1]， 张调风[1,2]
（1. 青海省气候中心，青海 西宁 810001；2. 兰州大学大气科学学院，甘肃 兰州 730000）

摘 要： 利用53个气象观测站1961—2017年5—9月逐日降水资料，分析了青藏高原东北部雨季降水量的变化特征，以及不同等级降水变化在降水量增量中的相对贡献。结果表明：1961—2017年青藏高原东北部干旱区雨季降水量呈增加趋势，半干旱区和半湿润区降水量的极端性增强。大部分地区的降水强度普遍增加。进一步分析可知，青藏高原东北部雨季降水量变化主要由降水强度的变化引起，同时中雨等级降水增加贡献大于其他等级降水。半湿润区和半干旱区东部降水极端化趋势明显增强。该结果有助于进一步理解和认识青藏高原东北部生态环境变化的气候效应。

关键词： 青藏高原东北部；降水等级；降水量；贡献度

青藏高原作为全球气候变化的敏感区和指示器[1,2]，由于其独特的地形，在气候变暖背景下，区域水文过程的空间差异显著[3-5]，降水季节性明显，如夏季降水具有主导性、雨季缩短、降水集中度高等特征[6-8]；整体上，东西部的降水差异较大，西北部较均匀、东南部降水年内变异大[9-11]，且未来20~50 a降水量将持续增加，而在高原地区植被对降水的响应更敏感，降水的持续增加会使植被生长较为脆弱[12]。从不同区域来看，高原东部和西南部有增温的特点，有利于牧草生产，而东北部略有变干趋势，对牧草生产不利[13]。由此说明，气候变化对生态不利区域主要分布在高原东北部。同时，青藏高原东北部属于农牧业交错地带，行政区划上包括青海省以及甘肃省部分地区，是青藏高原人口密度和经济总量最大区域[14]，属于典型的气候过渡带，区内自然景观多样，有祁连山国家公园和三江源国家公园，也是我国重要生态屏障区的重要组成部分。受其气候变化的复杂性和特殊的地理位置的影响，青藏高原东北部雨季极端降水事件增多且分布不均[15]，各量级的降水增加在有利于主要湖泊水位升高、河流流量增加[16]、农业区气候生产潜力提高[17]的同时，短时强降水也造成了较为严重的暴雨洪涝灾害，如2018年青海省就发生了104起，造成的灾害为近10 a最严重[18]，降水日数和降水强度变化对不同区域生态环境产生的影响不同，曾颖婷等[19]研究得出，全国不同流域降水频次和强度对夏季总降水量和极端降水量长期变化的贡献不同，因此，有必要进一步探讨青藏高原东北部不同区域降水日数和降水强度在降水量变化中的相对贡献，以期为该区域农牧业生产、气象灾害预警以及进一步提升生态气象服务保障能力提供一定的参考依据。

1 资料与方法

1.1 研究资料

1961—2017年5—9月的逐日降水资料由青海省和甘肃省信息中心提供，包括青藏高原东北部68个气象站，数据经过了均一化质量控制。为了保证观测资料的代表性和研究时间序列的一致性，剔除

收稿日期： 2020-04-23； **修订日期：** 2020-09-14
基金项目： 中国气象局气候变化专项（CCSF202021）；国家自然科学基金项目（41861013）资助
作者简介： 杨昭明（1963-），男，高级工程师，研究方向为高原气象预报及服务. E-mail: 88111686@qq.com
通讯作者： 张调风. E-mail: ztf_qhzx@163.com

了连续缺测＞5 d的站点，对于连续缺测≤5 d的站点数据，利用邻近台站前后时间数据插值进行了补充订正[20]，最终选用53个站点的资料。本文参考中国科学院地理科学与资源研究所提供的中国生态地理分区，将青藏高原东北部划分了半湿润、半干旱和干旱区3个气候区(图1)[21]。当日降水量≥0.1 mm时，记为1个降水日，将5—9月降水日的降水总量记为雨季总降水量。雨季降水总量与降水日数之比记为降水强度。文中的气候常年值指的是1981—2010年的平均值。

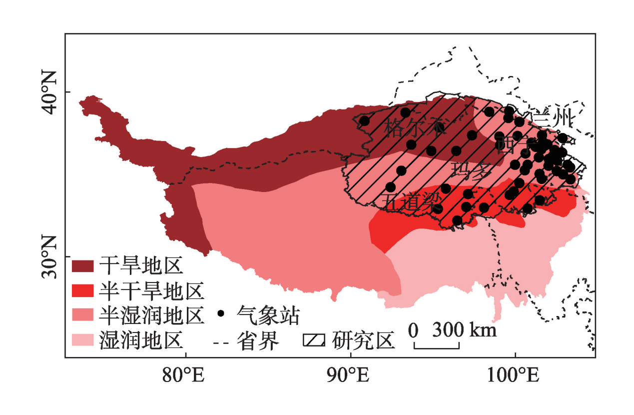


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

由于研究区降水量空间分布差异较大，参考中国气象局降水等级标准[22]，定义24 h内降水量0.1~10 mm为小雨等级，10~25 mm为中雨等级，25~50 mm为大雨等级，50 mm以上为暴雨。

1.2 贡献量的研究方法

Karl 等[23]指出降水量变化由降水日数和降水强度变化共同引起，由降水日数变化引起的降水量变化部分 b_e 可由降水日数的趋势值 b_f 和研究时段内平均降水量 $\overline{P_e}$ 得到，该方法在中国部分地区[24-27]降水特征研究中均得到很好的应用，具体过程如下：

计算雨季的平均降水量($\overline{P_e}$)和降水日数的趋势值(b_f)，可得到降水日数趋势值引起的降水量变化趋势(b_e)，即

$$b_e = \overline{P_e}(b_f) \tag{1}$$

降水强度变化引起的降水量变化的趋势分量(b_i)可由降水总趋势增量(b)与降水日数引起的降水量趋势分量之差得到：

$$b_i = b - b_e \tag{2}$$

为比较降水强度和降水日数变化趋势在降水增量中的贡献，即利用 b_i、b_e 的绝对值差值与某一等级降水多年总量均值 $\overline{P_e}$ 的比值来反映，即

$$r = \frac{(|b_i| - |b_e|)}{\overline{P_e}} \tag{3}$$

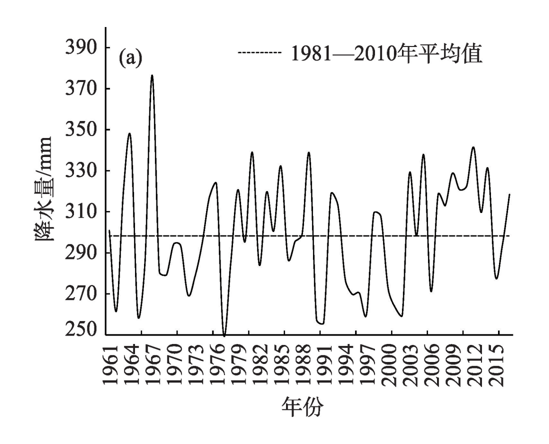
式中：r 为差值百分数，正值表示降水强度变化趋势引起的降水增量大于降水日数增量变化，负值则表示与之相反的意义。

另外，采用最小二乘法估计得到降水变化的显著性，根据信度水平 α 确定显著性，若相关系数 $|R| > R_\alpha$ 表明变量随时间的变化趋势是显著的[28]。

2 结果与分析

2.1 降水的变化特征

2.1.1 降水变化的时空特征 统计1961—2017年青藏高原东北部降水量的变化趋势及分布情况，结果如图2所示。由图2a所示，青藏高原东北部降水



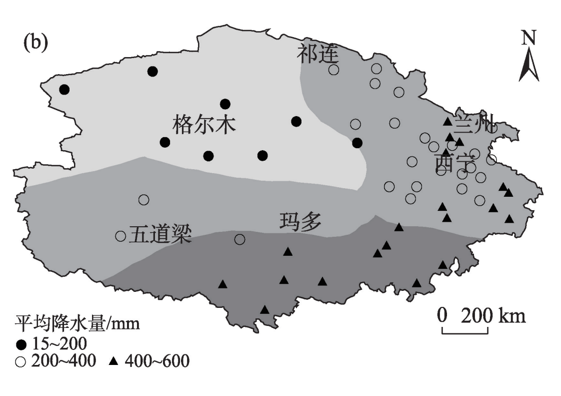


图2 1961—2017年青藏高原东北部降水量的变化曲线(a)和平均降水量空间分布(b)

Fig. 2 Change over the Northeast Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2017 (a) and the spatial distribution of average precipitation (b)

较常年偏多时段主要集中在20世纪80年代、21世纪,尤其在2003—2017年,15 a中有13 a偏多。由图2b所示,研究区平均降水量分布在15~600 mm区间,最高值出现在久治,为605.2 mm,最低值出现在冷湖,为15.4 mm。年平均降水量空间差异显著,干旱区的降水量稀少,其年降水量低于200 mm,半湿润地区在400~600 mm之间,由此可以看出,青藏高原东北部降水南北差异大于东西差异。

2.1.2 不同生态区的降水变化趋势 表1给出了1961—2017年青藏高原东北部不同气候区雨季降水量、降水日数、降水强度的变化趋势。由此可以看出,1961—2017年来青藏高原东北部不同气候区降水资源呈现明显差异,具有如下特征:干旱区降水量增加趋势比半干旱区明显,而半湿润区呈减小趋势;干旱区降水日数及降水强度均呈增加趋势,但变化不显著;半干旱区降水强度对降水量增加贡献大于降水日数,而半湿润区降水日数对降水量减小贡献大于降水强度。说明气候变暖背景下,不同气候区降水特性变化不同,气候变暖加强了干旱、半干旱区局地水汽再循环,提高了水汽再循化对降水的贡献,导致降水偏多,这与李林等[20]、姚檀栋等[29]研究高原地区不同时间尺度上气候变化的组合类型是一致的。

表1 1961—2017年不同气候区雨季降水总量、降水日数、降水强度变化

Tab. 1 Changes of rainfall amount, days and intensity of precipitation in different climate regions in rainy season during 1961–2017

	降水总量	降水日数	降水强度
干旱区	2.92*	0.67	0.04
半干旱区	4.54	−0.69	0.11**
半湿润区	−1.69	−1.87**	0.07*

注:*表示通过了0.05的显著性水平,**表示通过了0.01的显著性水平。

为了进一步了解降水资源的变化,将降水总量、降水日数和降水强度结合起来,分别用T_P、T_d和T_i表示三者的变化趋势,可归纳为6种情况(表2)。雨季降水量变化由降水日数和降水强度共同决定,其中,以降水强度与降水日数同增、降水强度增加与降水日数减小引起降水量增加的情况较为普遍,其次是降水强度与降水日数同减引起降水量减少的情况。

表2 雨季降水总量、降水日数、降水强度变化的6种情况

Tab. 2 The six catalogs of the trends in the rainfall amount, days and intensity of precipitation in rainy season in the study area

变化趋势	站点数	百分比/%
$T_P\uparrow T_d\uparrow T_i\downarrow$	1	1.89
$T_P\uparrow T_d\uparrow T_i\uparrow$	20	37.74
$T_P\uparrow T_d\downarrow T_i\uparrow$	19	35.85
$T_P\downarrow T_d\uparrow T_i\downarrow$	1	1.89
$T_P\downarrow T_d\downarrow T_i\uparrow$	3	5.66
$T_P\downarrow T_d\downarrow T_i\downarrow$	9	16.98

注:T_P、T_d和T_i表示降水总量、降水日数和降水强度,↑、↓分别代表上升、下降趋势。

由图3可以看出,干旱区、半干旱区大部分区域降水呈增加趋势,减少的区域主要集中在半湿润区的南部。干旱区大部分降水量、降水日数、降水强度三者出现"同增"的现象。半干旱区和半湿润区的情况比较复杂,大部地区降水强度变化与降水量变化出现"同增同减"的现象,而降水日数有增有减。

2.2 降水日数和强度的相对贡献

由前面分析可知,降水强度增强(降水日数减少)都会引起降水量增加(减少),而且不同区域的变化情况略有不同。为了进一步了解二者在降水量变化中的相对贡献,这里采用相对趋势变化定量地比较了它们对降水量变化的相对贡献。由图4表明,青藏高原东北部大部分地区雨季降水偏多是降水强度增大造成的,这与曾颖婷等[19]采用统计回归分析方法研究全国降水频次和强度对降水量变化的贡献,得出高原东北部降水强度对夏季总降水变

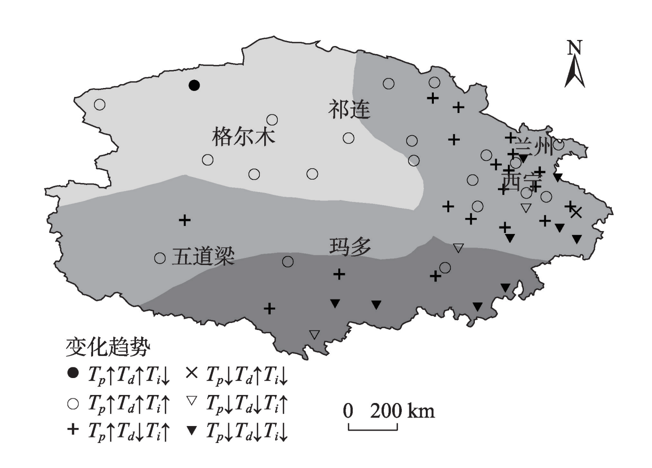
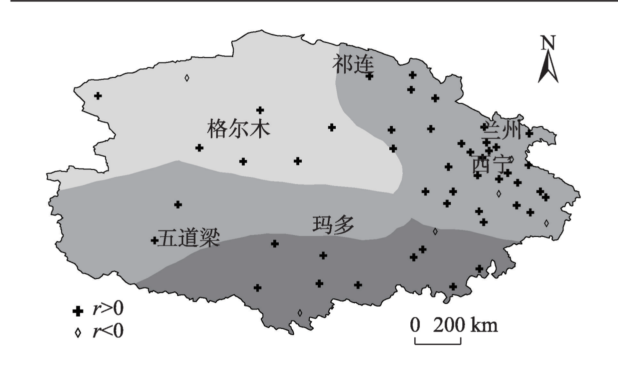


图3 T_P、T_d和T_i 6种变化情况的空间分布

Fig. 3 Trends of the rainfall amount of precipitation in relation to the trends in days and intensity in the study area



注：r>0表示降水强度增加对降水量增加贡献大，r<0表示降水日数增多对降水量增加贡献大。下同。

图4 降水日数、降水强度变化对降水量增量贡献空间分布

Fig. 4 Incremental contribution distribution of the trend variabilities of precipitation intensity and days to the total precipitation in the study area

化贡献较大的结论一致。由此得知，该区域大部分区域降水强度呈正贡献的分布模式，意味着总体上高原东北部降水的极端化增强。李万志等[30]研究得出，半湿润区和半旱区东部是暴雨洪涝致灾的高风险区，结合前面分析可以看出，这些区域暴雨洪涝的致灾的原因是由于短时强降水引发的。

2.3 不同等级降水的相对贡献比较

张强等[31]研究得出，不同等级降水对西北地区汛期降水增加的影响不同。因此这里进一步探讨了青藏高原东北部不同等级降水在降水量增加中的贡献（图5）。小雨等级降水特征与其他等级降水有明显的差异。干旱区西北部、半湿润区东南部和湿润区南部小雨日数增多，对降水量增加为正贡献，其余地区降水强度的主导作用大。中雨以上强度等级的降水强度在大部分地区贡献大，尤其暴雨量级降水，降水强度正贡献的区域主要集中在干旱区东部、半干旱区东部和半湿润地区的局部。而整个研究区而言，大部分地区中雨等级降水贡献最大，其次为大雨，小雨的贡献最小（图6）。这种分布可能是因为受水汽来源影响，高原地区35°N以北的地区降水影响系统主要受西风控制，30°N以南的地区主要受印度季风的影响，30°~35°N之间区域主要受两者共同影响[32-33]。

3 讨论与结论

基于1961—2017年的气象站点观测资料，分析全球变暖背景下青藏高原东北部雨季降水变化特征，采用贡献度分析，定量评估了降水强度和降水

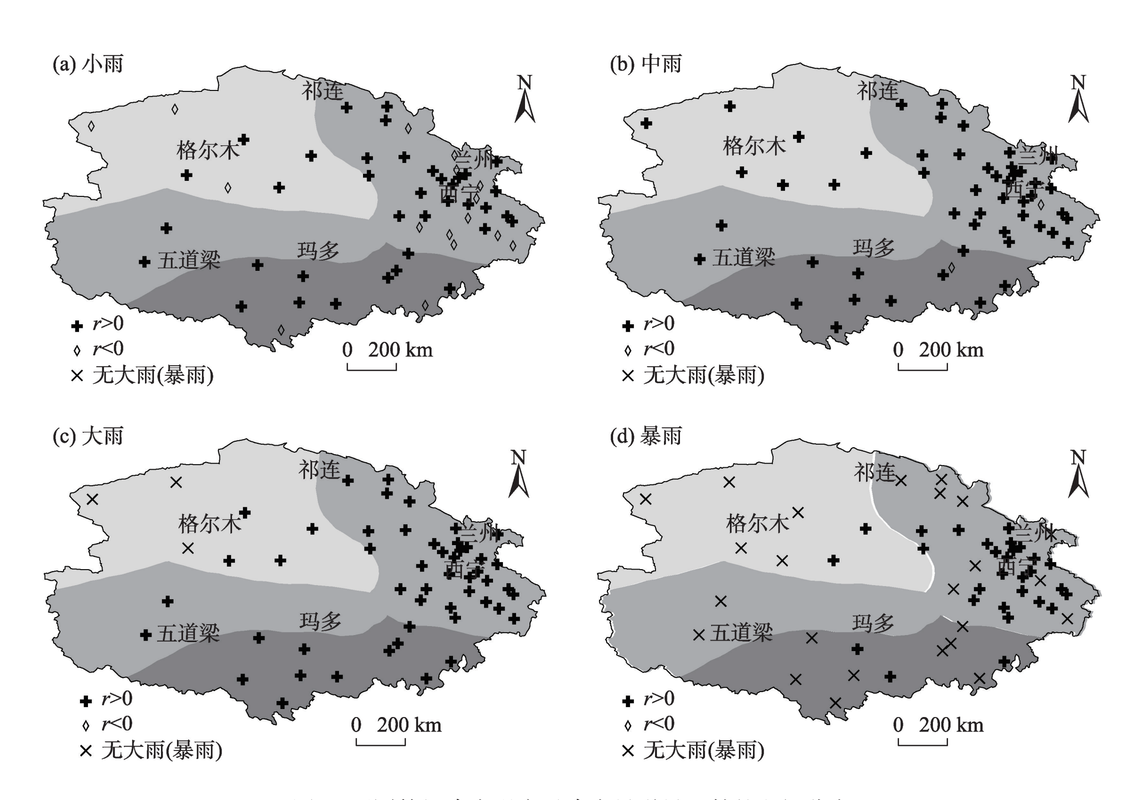


图5 不同等级降水强度对降水量增量贡献的空间分布

Fig. 5 Incremental contribution distribution of different precipitation classes in precipitation intensity and days in the study area

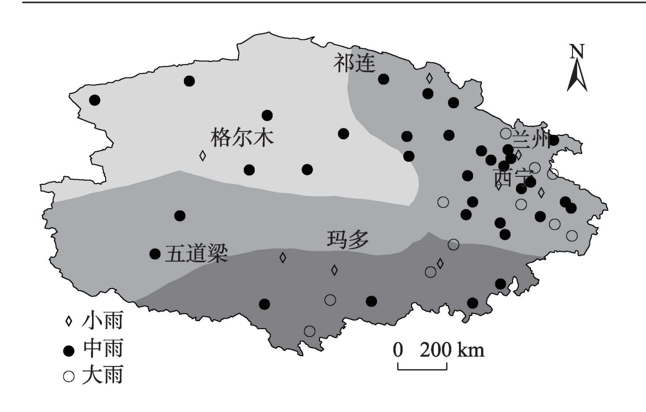


图6　不同等级降水强度对降水量增量贡献的比较

Fig. 6　The Comparison of contribution of different grades precipitation intensity, which is displayed with spatial distribution to precipitation increment in the study area

日数变化对降水量增量的贡献,得到如下结论:

1961—2017年青藏高原东北部干旱区降水量呈增加趋势,半干旱区和半湿润区降水量的极端性在增强,而各区域降水强度增强的现象比较普遍,不同气候区降水特性变化不同,可能是气候变暖加快了干旱、半干旱区水汽循环,导致降水偏多[20],对气候变暖响应的程度更敏感。研究区大部分地区中雨量级的贡献最大,半干旱区和半湿润区东部降水的极端化增强。

青藏高原东北部大部分地区雨季降水量并没有显著增加,与整个高原平均显著增加趋势不同,根据李林等[14]研究,该地区是气候过渡带,主要受高原季风、西风、印度季风等多因子的协同影响,不同因子在不同月份主导作用不同,易产生此消彼长的效应,同时不同因子的年代际震荡的周期不同,两方面的共同作用决定了该地区暖湿的显著性低于其他地区。

小雨减少、中雨增加的特征与高继卿等[34]得出的干旱地区较其他地区小雨频率下降、中雨频率升高的结论较为一致。小等级降水与植被的相关关系在年降水量大于600 mm的地区呈负相关,表明小降水事件对降水充沛的地区植被生长起不到关键作用,而在小于600 mm的地区呈正相关,相比较而言,小量级降水是干旱地区植物生长的关键作用,同时与降水强度相比,降水日数的影响也不容忽视。该研究结果为青藏高原地区植被恢复和保护提供了新的见解,也说明将降水形态的影响纳入陆—气耦合相关模型研究中是十分重要的。

参考文献(References):

[1]　潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器 Ⅲ.青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1996, 32(1): 108-115. [Pan Baotian, Li Jijun. Qinghai-Tibetan Plateau: A driver and amplifier of the global climatic change Ⅲ: The effects of the uplift of Qinghai-Tibetan Plateau on climatic changes[J]. Journal of Lanzhou University: Naturnal Sciences, 1996, 32(1): 108-115.]

[2]　姚檀栋, 朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策[J]. 地球科学进展, 2006, 21(5): 459-464. [Yao Tandong, Zhu Liping. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(5): 459-464.]

[3]　姚檀栋, 朴世龙, 沈妙根, 等. 印度季风与西风相互作用在现代青藏高原产生连锁式环境效应[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 976-984. [Yao Tandong, Piao Shilong, Shen Miaogen , et al. Chained impacts on modern environment of interaction between westerlies and indian monsoon on Tibetan Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 976-984.]

[4]　葛根巴图, 魏巍, 张晓, 等. 柴达木盆地极端气候时空趋势及周期特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 304-313. [Ge Genbatu, Wei Wei, Zhang Xiao, et al. Spatiotemporal trends and periodic features of climate extremes over the Qaidam Basin, China, during 1960-2014[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 304-313.]

[5]　张旺雄, 刘普幸. 1961—2017年柴达木盆地干湿状况及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1391-1400. [Zhang Wangxiong, Liu Puxing. Surface humid situation and its affecting factors in the Qaidam Basin from 1961 to 2017[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1391-1400.]

[6]　林厚博, 游庆龙, 焦洋, 等. 青藏高原及附近水汽输送对其夏季降水影响的分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 309-317. [Lin Houbo, You Qinglong, Jiao Yang, et al. Water vaporansportation and its influences on precipitation in summer over Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(2): 309-317.]

[7]　李晓英, 姚正毅, 肖建华, 等. 1961—2010年青藏高原降水时空变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1233-1240. [Li Xiaoying, Yao Zhengyi, Xiao Jianhua, et al. Analysis of the spatial-temporal variation characteristics of precipitation over the Tibetan Plateau from 1961 through 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1233-1240.]

[8]　韩熠哲, 马伟强, 王炳赟, 等. 青藏高原近30年降水变化特征分析[J]. 高原气象, 2017, 36(6) : 1477-1486. [Han Yizhe, Ma Weiqiang, Wang Bingyun, et al. Climatic characteristics of rainfall change over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1980 to 2013[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(6) : 1477-1486.]

[9]　杨玮, 何金海, 王盘兴, 等. 近42年来青藏高原年内降水时空不均匀性特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 376-384. [Yang Wei, He Jinhai, Wang Panxing, et al. Inhomogeneity characteristics of intra-annual precipitation over the Tibetan Plateau in re-

cent 42 years[J]. Acta Geographica and Sinica, 2011, 66(3): 376-384.]

[10] 齐文文, 张百平, 庞宇, 等. 基于TRMM数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征[J]. 地理科学, 2013, 33(8): 999-1005. [Qi Wenwen, Zhang Baiping, Pang Yu , et al. TRMM-data based spatial and seasonal patterns of precipitation in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(8): 999-1005.]

[11] 王坤鑫, 张寅生, 张腾, 等. 1979—2017年青藏高原色林错流域气候变化分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 652-662. [Wang Kunxin, Zhang Yinsheng, Zhang Teng, et al. Analysis of climate in the Selin Co Basin, Tibetan Plateau. from 1979 to 2017[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 652-662.]

[12] 张人禾, 苏凤阁, 江志红, 等. 青藏高原21世纪气候和环境变化预估研究进展[J]. 科学通报, 2015, 60(32): 3036-3047. [Zhang Renhe, Su Fengge, Jiang Zhihong, et al. An overview of projected climate and environmental changes across the Tibetan Plateau in the 21st century[J]. China Science Bull, 2015, 60(32): 3036-3047.]

[13] 韩国军, 王玉兰, 房世波. 近50年青藏高原气候变化及其对农牧业的影响[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1969-1975. [Han Guo-Jun, Wang Yulan, Fang Shibo. Climate change over the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts on local agriculture and animal husbandry in the last 50 years[J]. Resources Science, 2011, 33(10): 1969-1975.]

[14] 李林, 李晓东, 校瑞香, 等. 青藏高原东北部气候变化的异质性及其成因[J]. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1496-1505. [Li Lin, Li Xiaodong, Xiao Ruixiang, et al. The heterogeneity of climate change and its genesis in the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(7): 1496-1505.]

[15] 冯晓莉, 刘彩红, 祁栋林. 青海省汛期极端强降水特征及影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(5): 125-130. [Feng Xiaoli, Liu Caihong, Qi Donglin. Characteristics of extreme heavy precipitation events and their impacts in Qinghai Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(5): 125-130.]

[16] 戴升, 保广裕, 祁贵明, 等. 气候变暖背景下极端气候对青海祁连山水文水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1053-1066. [Dai Sheng, Bao Guangyu, Qi Guiming, et al. Impacts of extreme climatic events under the context of climate warming on hydrology and water resources in the Qinghai Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1053-1066.]

[17] 杨昭明, 冯晓莉, 黄霞, 等. 1987—2017年青海省东部农业区粮食作物生产潜力及产量差时空变化特征[J]. 中国农学通报, 2019, 35(3): 26-33. [Yang Zhaoming, Feng Xiaoli, Huang Xia, et al. Crops in eastern agricultural region of Qinghai during 1987-2017: Spatio-temporal variation characteristics of potential productivity and yield gaps[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(3): 26-33.]

[18] 杨昭明, 李万志, 冯晓莉, 等. 气候变暖背景下青海汛期暴雨洪涝及次生灾害风险评估[J]. 中国农学通报, 2019, 35(3): 131-138. [Yang Zhaoming, Li Wanzhi, Feng Xiaoli , et al. Risk assessment of rainstorm flood and its secondary disasters during flood season in Qinghai under climate warming[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(3): 131-138.]

[19] 曾颖婷, 陆尔. 1961—2010年我国夏季总降水和极端降水的变化[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(2): 131-138. [Zeng Yingting, Lu Er. Change of summer rainfall and extreme precipitation during1961-2010 in China[J]. Climatic Change Research, 2015, 11 (2): 131-138.]

[20] 李林, 李红梅, 申红艳, 等. 青藏高原气候变化的若干事实及其年际振荡的成因探讨[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6) : 1079-1089. [Li Lin, Li Hongmei, Shen Hongyan, et al. The truth and inter annual oscillation causes for climate change in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1079-1089.]

[21] 郑度, 李炳元. 中国生态地理区图[M]. 北京: 商务印书馆, 2005. [Zheng Du, Li Bingyuan. Chinese Eco-geographic Map[M]. Beijing: Beijing Commercial Press, 2005.]

[22] 中华人民共和国国家标准——降水量等级(GB/T 28592-2012) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012. [National Standard of the People's Republic of China precipitation Grade (GB/T 28592-2012) [M]. Beijing: China Standard Press, 2012.]

[23] Karl, Thomas R, Richard W Knight. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(2): 231-241.

[24] 徐新创, 张学珍, 戴尔阜, 等. 1961—2010年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J]. 地理研究, 2014, 33(7): 1335-1347. [Xu Xingchuang, Zhang Xuezhen, Dai Erfu, et al. Research of trend variability of precipitation intensity and their contribution to precipitation in China from 1961 to 2010[J]. Geographical Research, 2014, 33(7): 1335-1347.]

[25] 胡钰玲, 张莹, 朱安豹, 等. 中国大陆中纬度带不同等级降水的变化特征[J]. 中国沙漠, 2017, 37(2): 332-342. [Hu Yuling, Zhang Ying, Zhu Anbao, et al. Variation of precipitation in different classes in midlatitude belt of Chinese mainland[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(2): 332-342.]

[26] 王腾, 孙晓光, 李白萍. 昌都市近36 a暴雨气候特征分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(1): 75-80. [Wang Teng, Sun Xiaoguang, Li Baiping. The climatic characteristic and its change of the Qamdo rainstorm in the past 36 years[J]. Torrential Rain and Disaster, 2017, 36(1): 75-80.]

[27] 梁苏洁, 程善俊, 郝立生, 等. 1970—2015年京津冀地区暖季小时降水变化特征[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(2): 105-114. [Liang Sujie, Cheng Shanjun, Hao Lisheng, et al. Analysis on the characteristics of hourly precipitation variations in Beijing-Tianjin-He-bei region during 1970-2015 [J]. Torrential Rain and Disasters, 2018, 37(2): 105-114.]

[28] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 44-45. [Wei Fengying. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 44-45.]

[29] 姚檀栋, 刘晓东, 王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题[J]. 科学通报, 2000, 45(1): 98-105. [Yao Tandong, Liu Xiaodong,

Wang Ninglian. The Qinghai-Tibet Plateau Region of the magnitude of the problem of climatechange[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(1) : 98–105.]
[30] 李万志, 余迪, 冯晓莉, 等. 基于风险度的青海省暴雨洪涝灾害风险评估[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 680–688. [Li Wanzhi, Yu Di, Feng Xiaoli, et al. Risk assessment of rainstorm and flood disasters based on the hazard grades/indices in Qinghai Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(3): 680–688.]
[31] 张强, 林婧婧, 刘维成, 等. 西北地区东部与西部汛期降水跷跷板变化现象及其形成机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(12): 2064–2078. [Zhang Qiang, Lin Jinjin, Liu Weicheng, et al. Precipitation seesaw phenomenon and its formation mechanism in the eastern and western parts of Northwest China during flood season[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(12): 2064–2078.]
[32] Yao T D, Masson-Delmotte V, Gao J, et al. A review of climatic controls on $\delta^{18}O$ in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations[J]. Reviews of Geophysics, 2013, 51(4): 525–548.
[33] 朱艳欣, 桑燕芳. 青藏高原降水季节分配的空间变化特征[J]. 地理科学进展, 2018, 37(11): 1533–1544. [Zhu Yanxin, Sang Yanfang. Spatial variability in the seasonal distribution of precipitation on the Tibetan Plateau[J]. Progress in Geography, 2018, 37(11): 1533–1544.]
[34] 高继卿, 杨晓光, 董朝阳, 等. 气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 99–110. [Gao Jiqing, Yang Xiaoguang, Dong Chaoyang, et al. Precipitation resource changed characteristics in arid and humid regions in Northern China with climate changes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 99–110.]

Analysis of precipitation change and its contribution in the rainy season in the northeast Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2017

YANG Zhaoming[1], ZHANG Tiaofeng[1,2]
(1. Qinghai climate center, Xining 810001, Qinghai, China; 2. College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The study on the characteristics of precipitation in the Qinghai-Tibet Plateau under the background of climate warming is of great significance for revealing the impact of climate change on agriculture, animal husbandry, and ecological environment. Based on the daily precipitation data of 53 meteorological observation stations from May to September of 1961–2017, the characteristics of rainy season precipitation in the northeast Qinghai-Tibet Plateau and the relative contribution of changes in precipitation of different grades in precipitation increment were analyzed. The results showed that the rainy season precipitation in the arid region in the northeast of the Qinghai-Tibet Plateau increased and that in the semi-arid and semi-humid regions became extreme from 1961 to 2017. Precipitation intensity has generally increased in most areas. Further analysis showed that the change in rainy season precipitation in the northeast of the Qinghai-Tibet Plateau is caused by the change in precipitation intensity, and the increase in contribution of moderate rainfall grade precipitation is greater than that of other grade precipitation. The trend of precipitation extremization in the east of the semi-humid and semi-arid regions was obviously enhanced. The results are helpful in understanding the climatic effect of change in ecological environment on the northeast of Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: Northeast Qinghai-Tibet Plateau; classified precipitation; precipitation; contribution